

Działanie śruby napędowej

Śruba napędowa przybrała swoją nazwę od sposobu działania, a ściślej, od rodzaju ruchu, jaki wykonuje. Ruch śrubowy składa się bowiem z ruchu postępowego wzdłuż osi śruby oraz ruchu obrotowego, odbywającego się wokół osi śruby. Dzięki temu, upraszczając, „wkręca” się ona w wodę tak, jak zwykła śruba w nakrętkę, powodując ruch jachtu.

Fot. Adobe Stock / Denys

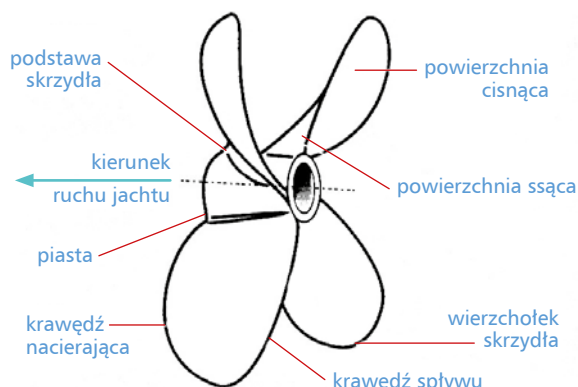
Śruba napędowa otrzymuje od silnika, za pośrednictwem linii wałów, moment obrotowy, który przekształca w siłę równoważącą opór kadłuba. Wytworzenie tej siły możliwe jest dzięki odpowiedniej formie geometrycznej śruby. Ta forma opiera się właśnie na geometrii linii i powierzchni śrubowej. Do omówienia działania śruby konieczne jest najpierw opisanie budowy typowej śruby oraz wyjaśnienie niektórych jej cech i zjawisk związanych z jej pracą.

Każda śruba napędowa składa się z dwóch grup elementów połączonych ze sobą w jedną całość, a mianowicie z piasty i skrzydeł. Piasta śruby, wykonana w postaci tulei, umożliwia zamocowanie jej na końcówce wału śrubowego. Skrzydła połączone w swej podstawie z piastą, będące wycinkami wspomnianych powierzchni śrubowych, wytwarzają podczas obrotu określoną siłę nośną, której pewna część zużyta zostaje na pchanie kadłuba, a zatem na zrównoważenie siły oporu.

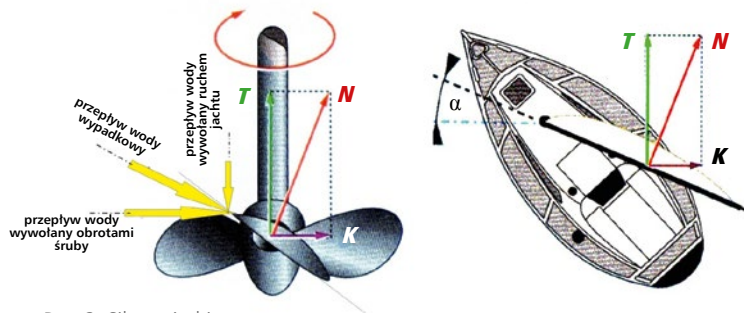
Na rysunku 1 pokazano przykładowo w ogólnym widoku śrubę czteroskrzydłową [2]. W każdym skrzydle wyróżnić można dwie powierzchnie śrubowe: jedną zwróconą w kierunku ruchu kadłuba, zwaną powierzchnią ssącą, drugą natomiast, cisnącą, znajdującą się po stronie przeciwnej. Część zarysu skrzydła nacierającą na wodę w czasie pracy (od strony kadłuba) nazywa się krawędzią nacierającą, natomiast tę od strony przeciwległej krawędzią spływu. Na przejściu krawędzi nacierającej w krawędzi spływu znajduje się wierzchołek skrzydła, a zatem punkt najbardziej oddalony od osi piasty.

Trzeba tu od razu zaznaczyć, że spotyka się śruby dwu-, trzy-, cztero- a czasem i pięcioskrzydłowe. Śruby dwuskrzydłowe stosuje się najczęściej w napędach pomocniczych jachtów żaglowych, ponieważ stawiają stosunkowo mały opór w czasie płynięcia pod żaglami. W pięcioskrzydłowe śruby wyposaża się czasem duże, krążownicze jachty motorowe w celu uniknięcia drgań ich kadłubów.

Jak to się więc dzieje, że dzięki takiej śrubie jacht płynie? Otóż w czasie obrotu śruby, na jej skrzydła, których płaszczyzny usytuowane są skośnie do osi wału, napływają strugi wody pod określonym kątem. W wyniku tego na powierzchniach ssących skrzydeł powstają



Rys. 1. Widok śruby czteroskrzydłowej z zaznaczonymi elementami



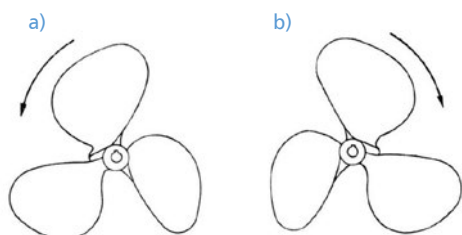
Rys. 2. Siły na śrubie

N – siła nośna, T – siła naporu, K – siła generująca moment obrotowy

siły nośne, analogicznie jak na żaglu [3]. Uwzględniając sumę tych sił, otrzymuje się wypadkową siłę nośną N (rys. 2). Składowa pozioma T siły nośnej, będąca sumą składowych poziomych z wszystkich skrzydeł, działa w kierunku ruchu jachtu i nazywana jest naporem. Napór, a ściślej użyteczna siła napędzająca, musi równoważyć opór jachtu.

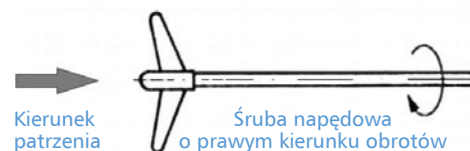
Wzajemna relacja między naporem T i użyteczną siłą napędzającą T_N określona jest zależnością $T_N = T - \Delta T$, gdzie ΔT oznacza stratę naporu wynikającą ze ssania wody przez śrubę z obszaru przed jej kręgiem. Innymi słowy, ΔT jest siłą ssania skierowaną przeciwnie do kierunku wytworzonego przez śrubę naporu. Składowa pionowa K siły nośnej, będąca sumą takich składowych z wszystkich skrzydeł, daje względem osi piasty moment obrotowy, który równoważony jest momentem obrotowym silnika. Przy kierunku obrotów śruby przeciwnym do zaznaczonego na rysunku, charakter pracy śruby ulega zmianie. Prędkość obrotowa i postępową mają kierunki przeciwne, zmienia się również kierunek działania siły naporu T – śruba ciągnie kadłub, a zatem mamy do czynienia z ruchem wstecznym. Krawędź spływu spełnia teraz rolę krawędzi nacierającej, a powierzchnia ssąca jest powierzchnią cisnącą. Wytworzona siła nośna wskutek nieodpowiedniego kąta natarcia jest mniejsza, zatem znacznie mniejsza jest siła T . Jednym słowem efekt pracy śruby znacznie się pogarsza.

Wyjaśnienia wymaga jeszcze sposób określania lewo- i prawoobrotowej śruby. W zależności od strony, z której patrzy się na śrubę, można tę samą śrubę określić jako lewo- lub prawoobrotową. Według ustaleń Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO (International Organization for Standardization) dla określenia kierunku jej obrotów obserwator powinien patrzeć na nią od strony zakończenia piasty, tak jak pokazano na rysunku 3. Jeśli kierunek obrotów śruby

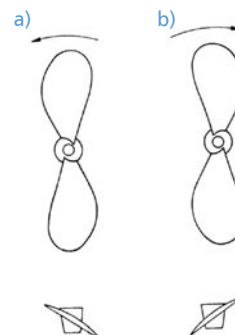


Rys. 5. Śruby trzyskrzydłowe

a – lewoobrotowa, b – prawoobrotowa



Rys. 3. Określanie kierunku obrotów śruby napędowej

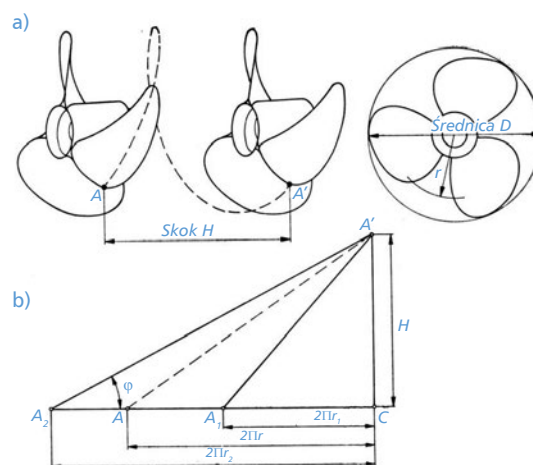


Rys. 4. Śruby dwuskrzydłowe; a – lewoobrotowa (lewoobrotowa), b – prawoobrotowa (prawoobrotowa)

jest zgodny z ruchem wskazówek zegara, to kierunek obrotów jest prawy, jeśli natomiast kierunek obrotów jest przeciwny do ruchu wskazówek zegara, to kierunek obrotów śruby jest lewy. Przy ruchu naprzód prawy kierunek obrotów ma śruba prawoskrętna, lewy natomiast śruba lewoobrotowa.

Na rysunku 4 przedstawiono dwie identyczne konstrukcyjnie śruby dwuskrzydłowe, przy czym jedna jest lewoobrotowa, druga prawoskrętna. W celu rozpoznania skrętu śruby, zachowując kierunek patrzenia taki jak poprzednio, należy śrubę ustawić jedną z łopatek do góry, tak jak to właśnie pokazano na rysunku. Jeśli prawa krawędź górnego skrzydła oddalona jest bardziej od obserwatora niż lewa, śruba jest prawoskrętna, gdy odwrotnie – lewoobrotowa.

Wyraźnie widoczny jest skręt łopatek na rzutach poziomych, którym (aby mogła być wytworzona odpowiednia siła nośna na skrzydle) odpowiada tylko taki kierunek obrotów jak zaznaczono. W praktyce można



Rys. 6. Parametry geometryczne śruby napędowej a – skok i średnica, b – rozwinięcie linii śrubowych, leżących na powierzchni śrubowej o stałym skoku

szybko i łatwo rozpoznać rodzaj śruby, jeśli położy się ją płasko na ziemi, tak jak pokazano na rysunku (płaszczyzna rysunku odpowiada płaszczyźnie ziemi). Odchylenie skrzydła (dolnego na rysunku) od ziemi wskaże skręt śruby. Tak więc jeśli śrubę trzeba chwycić w celu jej podniesienia lewą ręką, śruba jest lewoskrętna. Jeżeli śruba jest prawoskrętna, trzeba ją podnieść prawą ręką, chwytając za odstającą od ziemi krawędź skrzydła. Nie ma przy tym znaczenia, jak zostanie śruba położona – przednią czy tylną powierzchnią czołową piasty. Opisane sposoby identyfikacji śrub mają zastosowanie do każdej odmiany konstrukcyjnej, niezależnie od liczby skrzydeł. Widać to najlepiej na rysunku 5, przedstawiającym dwie trzyskrzydłowe śruby: lewo- i prawoskrętną.

Śrubę napędową charakteryzują dwa podstawowe parametry geometryczne, a mianowicie średnica i skok [4]. Średnica śruby D określona jest przez średnicę koła opisanego na skrajnych punktach skrzydeł (rys. 6).

Skok śruby H określa drogę, jaką przebędzie śruba wzdłuż osi, wykonując jeden pełny obrót. Opisana w ten sposób linia śrubowa (linia przerywana) przez dowolny punkt leżący na tworzącej powierzchni śrubowej daje w rozwinięciu linię prostą nachyloną do podstawy pod kątem φ , zwanym kątem skoku. Utworzony trójkąt AA'C jest tzw. trójkątem skoku. Taka linia śrubowa, która daje w rozwinięciu prostą (odcinek AA'), nazywa się linią śrubową o stałym skoku, a zatem śruba ma stały skok. Dla śruby o stałym skoku prędkość postępową jest stała. Przy zmiennym skoku śruby prędkość jest zmienna, a linia śrubowa w rozwinięciu jest linią krzywą. Dla śruby o stałym skoku wszystkie więc przekroje skrzydła (profile), niezależnie od odległości r od osi piasty, muszą poruszać się z taką samą prędkością postępową, przy czym im dalej położony jest dany przekrój od osi, tym większą drogę na obwodzie zakreśli on podczas obrotu. Zatem całą powierzchnię śrubową skrzydła przedstawia określona liczba leżących na niej linii śrubowych, które po rozwinięciu dają charakterystyczny obraz (rys. 6). Im bliżej położony jest przekrój skrzydła (im mniejszy jest promień r), tym większy jest kąt natarcia φ (kąt skoku). Obydwie wielkości charakteryzujące śrubę, czyli jej średnica i skok, mają istotne znaczenie przy współpracy z silnikiem napędowym. Przy zbyt małej średnicy śruby lub małym skoku silnik zbyt łatwo uzyskuje dużą prędkość obrotową. Taką śrubę nazywa się „lekką”. Przy za dużej średnicy lub za dużym skoku śruby silnik nie może z kolei rozwinąć dużej prędkości obrotowej. Śrubę taką nazywa się „ciężką”. Zwykle dla jachtów wolnych o dużej wyporności dobierane są śruby o małym skoku i dość dużej średnicy, natomiast dla jachtów szybkich śruby o dużym skoku.

Biorąc pod uwagę, że skok śruby H jest drogą, to śruba przebyłaby tę drogę, wkręcając się w ośrodek stały w czasie wykonania jednego obrotu. Można zatem łatwo obliczyć drogę przebytą przez jacht, odpowiadającą jednemu obrotowi śruby. Ze względu na to, że śruba nie może „wkręcać” się w wodę w taki sposób, jak w ośrodek stały, rzeczywista droga, jaką przebędzie w czasie obrotu będzie mniejsza od skoku geometrycznego.

Odległość, na jaką się przesunie, nazywamy posuwem śruby h_p , określanym zależnością $h_p = H - h_s$ gdzie h_s jest poślizgiem śruby. Poślizg określa zatem stratę skoku wynikającą z „usuwania” się wody.

Śruby napędowe dzieli się na trzy odmiany konstrukcyjne:

- śruby stałe (nienastawne),
- śruby nastawne,
- śruby składane.

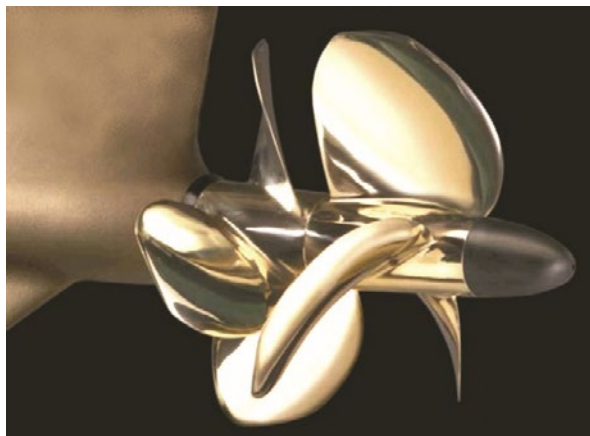
Śruby stałe (nienastawne) mają skrzydła sztywno połączone z piastą, nie mają więc względem niej żadnego możliwego ruchu. Zwykle tworzą z piastą jednolity odlew. Śruby te wykonywane są jako dwu-, trzy-, cztero-, a niekiedy i pięcioskrzydłowe. Mają różne co do wartości powierzchnie skrzydeł i różne profile. W zależności od tworzącej powierzchni śrubowej mogą mieć stały lub zmienny skok. Najczęściej jednak wykonuje się je o stałym skoku.

Śruby stałe mogą tworzyć układ, w którym dwie śruby o przeciwnych kierunkach obrotów umieszczone są na jednym wale śrubowym napędzanym przez jeden silnik. Taki układ śrub nazywany jest układem przeciwbieżnym, często zamiast wymieniania układu mówi się krótko: śruby przeciwbieżne (rys. 7). Wał śrubowy to wał w wale, jeden musi być wałem drażnionym, aby można w nim ułożyskować wał niedrażniony dla drugiej śruby. Tylna śruba napędowa ma mniejszą średnicę. Idea tego rozwiązania polega na odzyskiwaniu energii rotacyjnej przedniej śruby. Śruby firmy Volvo – Penta noszą nazwę Duoprop [4].

Zaletami śrub przeciwbieżnych są:

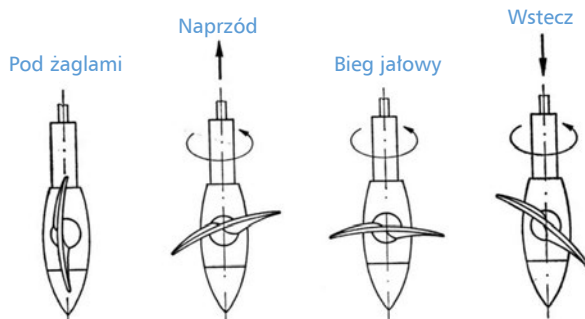
- moc doprowadzona do wału śrubowego rozkłada się na dwie śruby, dzięki czemu średnice śrub wypadają mniejsze przy tej samej prędkości obrotowej,
- przy zachowaniu średnicy śruby liczba obrotów może być zmniejszona,
- napór całkowity rozkłada się na dwie śruby, co powoduje zmniejszenie ich obciążenia i wzrost sprawności.

Druga z wymienionych odmian, czyli śruby nastawne (śruby o nastawnym skoku), mają skrzydła połączone z piastą w ten sposób, że mogą być odpowiednio do potrzeb ustawiane przez obrót względem osi prostopadłej

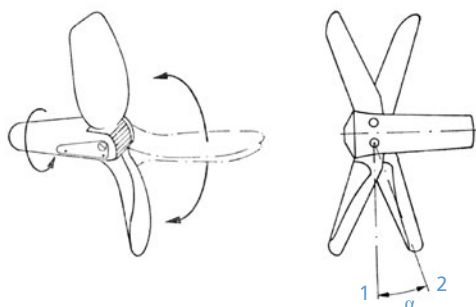


Rys. 7. Śruby przeciwbieżne

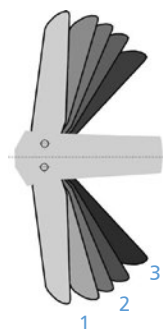
do osi piasty, a więc możliwa jest tu zmiana skoku śruby. Śruby nastawnej nie należy mylić ze śrubą o zmiennym skoku powierzchni śrubowej, którą mogą mieć niektóre śruby stałe. Śruby nastawne umożliwiają wykorzystanie mocy silnika napędowego przy znamionowej (nominalnej) prędkości obrotowej w każdych warunkach żeglugi, jak również pozwalają na zmianę prędkości i kierunku ruchu jachtu przy stałej prędkości obrotowej silnika. Przy odpowiedniej pozycji skrzydeł umożliwiają bieg jałowy silnika. W czasie żeglugi pod żaglami, dzięki odpowiedniemu ustawieniu skrzydeł, stwarzają minimalny opór. Różne położenia skrzydeł śruby nastawnej, odpowiadające biegowi naprzód, wstecz oraz biegowi jałowemu silnika i żeglugie pod żaglami pokazano na rysunku 8. Istnieje wiele konstrukcji śrub nastawnych różniących się między sobą pewnymi szczegółami konstrukcyjnymi, a przede wszystkim sposobem sterowania obrotem skrzydeł.



Rys. 8. Położenia skrzydeł śruby nastawnej w różnych fazach ruchu



Rys. 9. Widok śruby składanej i charakterystyczne jej położenia
1 – położenie przy ruchu wstecz, 2 – położenie przy ruchu naprzód



Rys. 10. Zmiana położenia skrzydeł śruby składanej przy ruchu naprzód w zależności od obciążenia
1 – małe obciążenie, 2 – średnie obciążenie, 3 – duże obciążenie w warunkach wysokiej fali i silnego wiatru

Ostatnie z wymienionych odmian śrub to śruby składane. Charakterystyczną cechą śruby składanej jest to, że jej skrzydła połączone z piastą za pomocą sworzni mogą obracać się w płaszczyźnie przechodzącej przez oś piasty. Ich wzajemne położenie zależy od obciążenia i prędkości obrotowej śruby. Widok śruby składanej pokazano na rysunku 9, na którym zaznaczony został kierunek rozkładania skrzydeł.

Podczas żeglugi naprzód, w miarę wzrostu oporów ruchu, średnica śruby zmienia się, a więc skrzydła przyjmują kolejne pozycje, jak pokazano na rysunku 10. Dla każdych warunków żeglugi ustala się określony stan równowagi między siłą odśrodkową a siłą naporu.

Oczywiście, takie czy inne wady śrub składanych wobec istotnej zalety, jaką jest automatyczne dostosowanie się do obciążenia, mogą nie mieć większego znaczenia. Ważny jest tu także fakt, że w wyniku złożenia się śruby stawia ona znacznie mniejszy opór niż śruba stała podczas żeglugi pod żaglami, zwłaszcza przy słabym wietrze. Woda opływa wówczas śrubę bez zaburzeń, w przeciwieństwie do opływu śruby stałej, za którą tworzą się zawirowania zwiększające opór (rys. 11). W regatowych jachtach może to mieć duże znaczenie. Warto jeszcze zwrócić uwagę na to, że wskutek długiej eksploatacji i braku konserwacji śruba taka może się czasem nie złożyć zupełnie po wyłączeniu silnika.

Pisząc o działaniu śruby napędowej, nie sposób nie wspomnieć o pewnych właściwościach manewrowych jachtu. Otóż śruba rzeczywista umieszczona w tylnej, podwodnej części kadłuba pracuje w innych warunkach niż śruba swobodna. Śruba swobodna pracuje bowiem w nieograniczonej dużej osrodku, o przepływie niezakłóconym obecnością kadłuba, czyli pracuje w jednorodnym polu prędkości. Śruba rzeczywista natomiast nie pracuje w jednorodnym polu prędkości, gdyż strumień wody dopływający do niej jest bardzo niejednorodny na skutek kształtu rufowej części kadłuba. W tej części wodnice kadłuba są zbieżne i dopływ strumienia wody z prawej i lewej burty nie jest równoległy, lecz zbieżny dośrodkowo, przy czym ta zbieżność jest większa w górnej części kręgu śruby niż w dolnej (rys. 12). Ta sytuacja powoduje powstanie złożonych zjawisk hydrodynamicznych, w wyniku których punkt przyłożenia siły naporu T nie będzie leżał w osi śruby, a będzie względem niej przesunięty, w tym przypadku dla śruby prawoobrotowej w prawo. Wystąpi zatem tak zwana mimośrodkowość siły naporu T , której miarą w kierunku poprzecznym jest ramię e . Zatem w czasie ruchu jachtu naprzód na prostym kursie powstanie moment $M = eT$, obracający kadłub w lewo – przy śrubie prawej i w prawo przy śrubie lewej. Oprócz tego na skutek podciśnienia występującego w obszarze maksymalnego naporu wystąpi przed śrubą ssanie, a zatem siła poprzeczna F_p działająca na rufę jachtu w prawo. Siła ta na ramieniu a (odległość środka masy jachtu od linii działania tej siły) daje moment $M_p = F_p a$ obracający kadłub w tym przypadku w lewo. Trzeba tu jednak wziąć pod uwagę, że obracanie jachtu nie nastąpi dokładnie względem środka masy, gdyż siła F_p powodować

będzie również przesuwanie jachtu w prawo. Ale nie ma to w rozważanym przypadku większego znaczenia. Jak już zaznaczono, omawiając rozkład sił na śrubie (rys. 2), przy kierunku obrotów śruby przeciwnym do zaznaczonego na rysunku charakter pracy śruby ulega zmianie, czyli gdy jacht wykonuje ruch wstecz. Prędkości obrotowa i postępową mają kierunki przeciwne do kierunków przy obrocie w prawo, zmienia się również kierunek działania siły naporu T – śruba ciągnie kadłub, a zatem mamy do czynienia z ruchem wstecznym. Krawędź spływu spełnia teraz rolę krawędzi nacierającej, a powierzchnia ssąca jest powierzchnią cisnącą. Wytworzona siła nośna na profilu wskutek nieodpowiedniego kąta natarcia jest mniejsza, zatem mniejsza jest znacznie siła T . Efekt pracy śruby znacznie się pogarsza. Praca śruby podczas ruchu wstecz wpływa bardzo niekorzystnie na zwrotność jachtu. Ma tu miejsce tak, jak przy ruchu naprzód przesunięcie punktu przyłożenia siły naporu T ku prawej burcie przy śrubie prawej, obracającej się w lewo przy ruchu wstecz. Nastąpi więc obracanie rufy w stronę lewej burty. Przy śrubie lewej obracanie to nastąpi w stronę prawej burty. Kiedy napęd posiada śrubę nastawną, wówczas ruch naprzód i wstecz odbywa się przy tym samym kierunku obrotów śruby. Wówczas opisane działanie będzie odwrotne niż śruby nienastawnej [1].

Oprócz opisanej przyczyny skręcania jachtu, pomijając moment M_p , dochodzi tu bardzo istotne działanie skręconego strumienia zaśrubowego na kadłub. Tak więc śruba prawoobrotowa (prawoskrętna), obracając się w lewo przy ruchu wstecz, powoduje odrzucanie strumienia zaśrubowego na kadłub. Przy czym z górnego kręgu śruby strumień odrzucany jest na górną część prawej burty kadłuba, z dolnego kręgu zaś na dolną część lewej burty. Ponieważ górne wodnice charakteryzują się większą pełnotliwością niż dolne, kąt natarcia strumienia wody na prawą burtę jest większy, czemu odpowiada większa wartość siły działającej na tę burtę. Jej składowa pozioma P , skierowana w stronę lewej burty, jest również większa od składowej poziomej L działającej z lewej burty w kierunku prawej.

Wypadkowa tych sił, często o znacznej wartości, skierowana jest w kierunku lewej burty, powodując skręcanie jachtu podczas ruchu wstecz w lewą stronę. Zatem jacht jednośrubowy ze śrubą prawą będzie miał przy ruchu wstecz wyraźną tendencję do skręcania w stronę lewej burty. Przy śrubie lewej – na odwrót. Niekiedy skręcanie to jest tak silne, że przy nieodpowiedniej konstrukcji steru trudno jest temu przeciwdziałać. Warto tu podkreślić, że w niektórych jednośrubowych jachtach wpływu tego nie daje się zniwelować działaniem steru, stąd niektóre jednośrubowe jachty mogą wykonywać cyrkulację wstecz tylko w jedną stronę. Zdarza się podczas ruchu wstecz, że jacht nie słucha steru, czyli wykonuje cyrkulację niezależną od kierunku wychylenia steru.

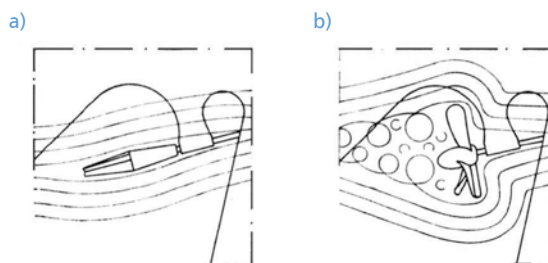
Opisane zjawisko skręcania jachtu pod wpływem pracującej śruby nazywane jest przez żeglarzy „efektem koła”, przypisując obracającej się śrubie w uproszczeniu

działanie podobne do działania koła. Taka interpretacja jest wygodna i szybko pozwala określić skręcanie rufy, które zawsze będzie następowało w kierunku obrotów śruby (rys.13). [7]

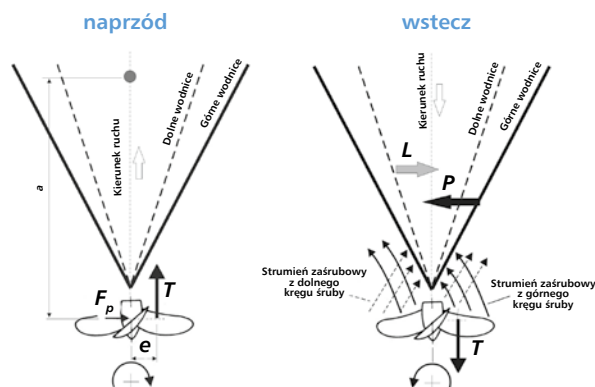
Dr inż. Krzysztof Zbierski

Literatura

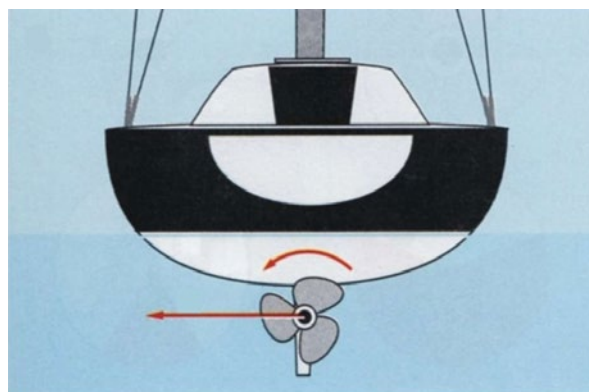
- [1] Welnicki W.: Sterowność okrętu. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1966.
- [2] Zbierski K.: Spalinowe napędy jachtów, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1987.
- [3] Zbierski K. (współautorstwo): Encyklopedia żeglarstwa pod redakcją Jacka Czajewskiego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [4] Zbierski K.: Dieslowskie napędy jachtów, Wydawca Studio M, Łódź 2012.



Rys. 11. Optyw śrub w czasie ruchu pod żaglami
a – śruby składanej, b – śruby stałej



Rys. 12. Mimośrodowość siły naporu spowodowana kształtem wodnic jachtu



Rys. 13. Efekt koła